

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
3 mai 2001 (03.05.2001)

(10) Numéro de publication internationale
PCT
WO 01/31364 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷: G01V 1/28

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US): COM-
PAGNIE GENERALE DE GEOPHYSIQUE [FR/FR];
1, rue Léon Migaux, F-91300 Massy (FR).

(21) Numéro de la demande internationale:
PCT/FR00/02984

(22) Date de dépôt international:
26 octobre 2000 (26.10.2000)

(72) Inventeurs; et
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement): AUDE-
BERT, François [FR/FR]; 13 Passage de l'Union,
F-75007 Paris (FR). GRANGER, Pierre-Yves [FR/FR];
52, rue de l'Effort Mutuel, F-91300 Massy (FR).

(25) Langue de dépôt: français

(74) Mandataires: MARTIN, Jean-Jacques etc.; Cabinet
Regimbeau, 20, rue de Chazelles, F-75847 Paris Cedex 17
(FR).

(26) Langue de publication: français

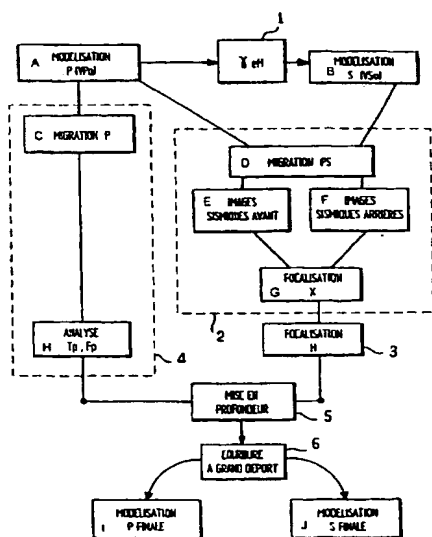
(30) Données relatives à la priorité:
99/13538 28 octobre 1999 (28.10.1999) FR

(81) États désignés (national): CA, NO, US.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: SEISMIC PROSPECTING METHOD USING CONVERTED WAVE PROCESSING

(54) Titre: PROCEDE DE PROSPECTION SISMIQUE METTANT EN OEUVRE UN TRAITEMENT SUR LES ONDES
CONVERTIES



$$\left\{ \frac{v_p}{v_s} \right\} / \left\{ \frac{v_p}{v_s} \right\} \quad (a)$$

- A...MODELING P (VPa)
1...VARIANT PARAMETER
B...MODELING S (VSa)
C...MIGRATING P
D...MIGRATING PS
E...FRONT SEISMIC IMAGES
F...REAR SEISMIC IMAGES
G...FOCUSING X
H...FOCUSING H
I...ANALYSING Tp, Fp
J...PROVIDING DISPLAY DEPTH
K...CURVATURE WITH LARGE OFFRET
L...FINAL MODELING OF P
M...FINAL MODELING OF S

(57) Abstract: The invention concerns a seismic prospecting method which consists in emitting underground a compressional seismic wave and picking up with sensors seismic data having at least a shearing component and in processing the data corresponding to said shearing component to deduce therefrom an information concerning the underground geological structure. The invention is characterised in that the method consists in determining an estimate of the ratio (a), wherein v_p and v_s are real local speed values of compression and shearing, wherein l represents the underground depth co-ordinate, and wherein z is the value of said depth co-ordinate at the bottom surface of the last layer to be analysed, and by inverting the seismic data so as to deduce the local speed values of compression and shearing for said layer to be analysed, using a modelling process wherein said estimate is used for the first invariant parameter γ_{eff} .

(57) Abrégé: Procédé de prospection sismique selon lequel on émet dans le sous-sol une onde sismique de compression et on recueille à l'aide de capteurs des données sismiques ayant au moins une composante de cisaillement et selon lequel on traite les données correspondant à cette composante de cisaillement pour en déduire une information sur la géologie du sous-sol, caractérisé en ce qu'on détermine une estimation du rapport (a), où v_p et v_s sont les valeurs de vitesses réelles locales de compression et de cisaillement, où l désigne la coordonnée de la profondeur dans le sous-sol, et où z est la valeur de cette coordonnée de profondeur à la surface inférieure de la dernière couche à analyser, et on inverse les données sismiques afin de déduire les valeurs de vitesses locales de compression et de cisaillement pour ladite couche à analyser, en utilisant une modélisation dans laquelle cette estimation est utilisée pour le paramètre invariant γ_{eff} .

WO 01/31364 A1

BEST AVAILABLE COPY



(84) États désignés (régional): brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

Publiée:

— Avec rapport de recherche internationale.

PROCEDE DE PROSPECTION SISMIQUE METTANT EN OEUVRE UN
TRAITEMENT SUR LES ONDES CONVERTIES

La présente invention est relative à un procédé de prospection
5 sismique mettant en œuvre un traitement sur les ondes converties.

Le principe général de la prospection sismique consiste à
provoquer, à l'aide d'une source sismique, un ébranlement dans le sous-sol
et à enregistrer, à l'aide de capteurs, des données sismiques générées par
cet ébranlement pour en tirer une information sur la géologie du sous-sol et
10 en particulier pour détecter la présence d'hydrocarbure.

On a représenté sur la figure 1 une onde acoustique se propageant
dans un sous-sol à partir d'une source 1. Cette onde acoustique est, dans
l'exemple représenté, une onde de compression qui se réfléchit dans le
sous-sol en se décomposant selon une onde réfléchie de compression et
15 une onde réfléchie de cisaillement.

On rappelle que les ondes de compression (ondes dites de type P)
vibrent dans leur direction de propagation, tandis que les ondes de
cisaillement (ondes dites de type S) vibrent quant à elles
perpendiculairement à cette direction de propagation. La vitesse de
20 propagation des ondes de cisaillement est inférieure à la vitesse de
propagation des ondes de compression et la connaissance des champs de
vitesse des ondes de compression et des ondes de cisaillement permet de
déterminer les informations sur le sous-sol. Par exemple, le rapport entre la
vitesse des ondes de compression et la vitesse des ondes de cisaillement
25 permet de déterminer le coefficient de pression des roches traversées et
sert également d'indicateur de présence d'hydrocarbure.

Classiquement, pour inverser des données sismiques, on utilise des
modélisations des champs de vitesses qui dépendent d'un certain nombre
de paramètres - que l'on considère comme étant invariants pour une
30 gamme de dépôts source/récepteur donnée et une zone spatiale
d'acquisition donnée, ces paramètres pouvant néanmoins être "lentement"
variables spatialement, c'est à dire être variables d'une zone spatiale à une
autre.

Pour inverser des données sismiques correspondant à des réflexions SS ou PP dans le sous-sol, on utilise des paramètres V_p et V_s qui représentent des vitesses apparentes des ondes de compression et des ondes de cisaillement après correction dynamique ("Normal Move Out" ou

5 "NMO" selon la terminologie anglo-saxonne généralement utilisée par l'homme du métier), ainsi que des paramètres T_p et T_s , qui représentent respectivement des temps de trajets verticaux des ondes P et S. Les paramètres T_p et V_p suffisent pour l'analyse des vitesses PP, tandis que les paramètres T_s et V_s suffisent pour l'analyse des vitesses SS.

10 L'analyse de vitesses converties (réflexions PS) se fait quant à elle généralement en utilisant, dans le domaine temporel, des modélisations faisant intervenir les paramètres V_p , V_s , ainsi qu'un paramètre V_c , où V_c est tel que :

$$T_c.V_c^2 = T_p.V_p^2 + T_s.V_s^2, \text{ avec } T_c = T_s + T_p.$$

15 Les modélisations utilisant ces trois paramètres sont performantes dans le cas de matériaux homogènes et isotropes pour les ondes S et P. Par contre dans le cas de milieux verticalement inhomogènes ou à forte anisotropie, il a été montré qu'il convenait de tenir compte de deux autres paramètres, désignés dans la littérature par γ_{eff} et γ_0 , où $\gamma_{\text{eff}} = \gamma_n^2 / \gamma_0$ avec

20 $\gamma_n = V_p/V_s$ et $\gamma_0 = T_s/T_p$.

Le déport x_c du point de réflexion par rapport à une source dépend en effet au premier ordre du paramètre γ_{eff} et au second ordre du paramètre γ_0 , ainsi que de la quantité $T_c.V_c^2$.

On pourra à cet égard avantageusement se référer à la publication

25 suivante :

- [1] Thomsen, L., 1998, "Converted-Wave reflection seismology over anisotropic, inhomogeneous media". 68th annual meeting, SEG Expanded Abstracts, 2048-2051.

Toutefois, dans cette publication, le paramètre γ_{eff} est supposé

30 connu. Or, dans la pratique, aucun des paramètres précités n'est habituellement immédiatement connu.

L'invention a quand à elle pour but de proposer un procédé de traitement sismique sur les ondes converties qui est particulièrement fiable et ce indépendamment de la connaissance préalable des paramètres γ_{eff} et γ_0 .

- 5 Récemment, il a été proposé de déterminer le déport latéral du point de conversion en utilisant la corrélation latérale entre d'une part des images à déport source/récepteur avant et d'autre part des images à déport source/récepteur arrière, c'est à dire des images obtenues en inversant les positions des sources et des récepteurs.

- 10 On pourra à cet égard se référer à :

- [1] Herrmann, P., Michaud, G., Granger P.Y., 1999, "Stacking mode-converted waves", presented at the CSEG conférence, Calgary, May 1999.

- L'invention propose quant à elle un procédé de prospection sismique selon lequel on émet dans le sous-sol une onde sismique de compression et on recueille à l'aide de capteurs des données sismiques ayant au moins une composante de cisaillement et selon lequel on traite les données correspondant à cette composante de cisaillement pour en déduire une information sur la géologie du sous-sol, caractérisé en ce qu'on détermine une estimation du rapport $\int_{z_0}^z v_p dl / \int_{z_0}^z v_s dl$, où v_p et v_s sont
- 15 les valeurs de vitesses réelles locales de compression et de cisaillement, où l désigne la coordonnée de la profondeur dans le sous-sol, où z est la valeur de cette coordonnée de profondeur à la surface inférieure de la dernière couche à analyser et où z_0 est la valeur de cette coordonnée de profondeur à la surface supérieure de cette couche ou d'une couche au
- 20 dessus de celle-ci,
- et on inverse les données sismiques afin de déduire les valeurs de vitesses locales de compression et de cisaillement pour ladite couche à analyser, en utilisant une modélisation dans laquelle cette estimation est utilisée pour le paramètre invariant γ_{eff} .
- 25 L'invention est avantageusement complétée par les différentes caractéristiques suivantes prises seules ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles :
- 30

- on détermine le paramètre γ_{eff} en mettant en œuvre, pour différentes valeurs possibles pour celui-ci, un traitement de migration des données sismiques qui correspondent à la composante de cisaillement, et en déterminant la valeur du paramètre γ_{eff} pour laquelle les images sismiques avant et arrière sont les mieux corrélées ;

- pour faire varier le paramètre γ_{eff} , on pose

$$vp_{\alpha} = \alpha vp_0 \text{ et } vs_{\beta} = \beta vs_0,$$

où vp_0 et vs_0 sont les valeurs approximatives préalablement déterminées pour vp et vs ,

- 10 et on fait varier à la fois les variables α et β ;

- la modélisation fait intervenir comme paramètres invariants au moins quatre des paramètres γ_0 , γ_{eff} , T_p , F_p , T_c , F_c , avec $\gamma_0 = T_s/T_p$, $\gamma_{\text{eff}} = F_p/F_s$, $T_c = T_p + T_s$, où T_p et T_s représentent respectivement des temps de trajets verticaux des ondes de compression et de cisaillement, où F_p est tel que $(F_p/T_p)^{1/2}$ représente une vitesse de compression et où F_c est tel que $((F_c - F_p)/T_s)^{1/2}$ représente une vitesse de cisaillement.

- lorsque l'on fait varier les variables α et β , on remplace les paramètres γ_0 , γ_{eff} , T_p , F_p , F_c par

$$\gamma_0' = \alpha/\beta * \gamma_0$$

20 $\gamma_{\text{eff}}' = \alpha/\beta * \gamma_{\text{eff}}$

$$T_p' = T_p * (1 + \gamma_0)/(1 + \gamma_0')$$

$$F_p' = F_p * \alpha^2 * (1 + \gamma_0)/(1 + \gamma_0')$$

$$F_c' = F_c * \alpha\beta * (1 + \gamma_0)/(1 + \gamma_0') * (1 + \gamma_{\text{eff}})/(1 + \gamma_{\text{eff}}')$$

- et on met en œuvre sur les données sismiques une migration
- 25 correspondant à ces nouveaux paramètres ;

- pour faire varier le paramètre γ_{eff} , on pose $\beta = 1/\alpha$ et on fait varier α ;
- à l'issue de la détermination du paramètre γ_{eff} , on fait varier vp et vs tout en maintenant γ_{eff} constant et on détermine le paramètre F_c pour lequel l'alignement selon la direction de départ est maximal ;

- pour faire varier v_p et v_s , on pose $v_{p\alpha} = \alpha v_{p1}$ et $v_{s\alpha} = \alpha v_{s1}$, où v_{p1} et v_{s1} sont des valeurs déterminées pour v_p et v_s dans l'étape 2, et on fait varier la variable α ;
 - à l'issue de la détermination du paramètre F_c , on détermine le paramètre
- 5 T_p et/ou le paramètre $\gamma_0 = T_s/T_p$;
- le paramètre T_p est avantageusement déterminé à partir du champ de vitesse v_p déterminé à partir de l'analyse de la composante de compression des données sismiques ;
 - on met ensuite en oeuvre un traitement de mise en profondeur commune
- 10 des modèles de vitesses S et P ;
- à l'issue du traitement de mise en profondeur, on met en oeuvre un traitement à courbure à grand déport en faisant varier les paramètres d'anisotropie δ et σ tout en maintenant constant le rapport $(1+2\delta)/(1+2\sigma)$.

15 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit. Cette description est purement illustrative et non limitative. Elle doit être lue en regard des figures annexées sur lesquelles :

- la figure 1, déjà discutée, illustre schématiquement la décomposition en ondes S et P d'une onde de compression émise par une source
- 20 acoustique ;
- la figure 2 illustre différentes étapes de traitement conformes à une mise en oeuvre possible pour l'invention ;
 - les figures 3a et 3b illustrent l'influence du positionnement du point de conversion commun dans la détermination de γ_{eff} .

25 Le traitement qui est décrit ci-après en référence aux figures 2 et suivantes se met en oeuvre sur des images sismiques constituées par des traces sismiques correspondant les unes à des ondes de type PS , les autres à des ondes de type PP , acquises au moyen d'un ensemble dense de sources sismiques et de capteurs géophones ou hydrophones 2D ou 3D

30 répartis selon au moins une direction d'acquisition.

Ce traitement comporte différentes étapes référencées de 1 à 6.

Dans une première étape (étape 1), on détermine des valeurs approchées pour les paramètres de modélisation des vitesses dans la couche d'analyse, en principe la première couche du sous-sol dont les vitesses sont à inverser, les vitesses des couches au dessus de cette
5 couche d'analyse ayant quant à elles été préalablement inversées, par exemple au moyen du même traitement.

Notamment, on détermine une estimation du paramètre γ_{eff} .

A cet effet, on utilise par exemple les images sismiques temporelles correspondant à l'acquisition PP initiale pour déterminer une valeur
10 d'initialisation pour le paramètre invariant V_p et on utilise les images sismiques temporelles correspondant à l'acquisition PS initiale pour déterminer une valeur d'initialisation pour le paramètre invariant V_s .

Dans un deuxième temps (étape 2), on met en œuvre un traitement destiné à déterminer une valeur de γ_{eff} plus précise.

15 A cet effet, on détermine une valeur de γ_{eff} pour laquelle le décalage ΔX , selon une direction spatiale d'acquisition, entre les images sismiques PS avant et les images sismiques PS arrière - lesquelles sont obtenues par inversion des positions des émetteurs et des sources le long de la direction d'acquisition considérée - est nul.

20 Plus précisément, les images sismiques avant sont obtenues en considérant un ensemble dense d'émetteurs alignés suivant l'azimut qui correspond à la direction d'acquisition et en relevant les traces sismiques obtenues pour les capteurs décalés par rapport aux émetteurs, dans la direction d'acquisition, d'un déport (algébrique) constant pré-défini. Les
25 images arrière sont obtenues en utilisant les émetteurs directement voisins des capteurs utilisés pour l'acquisition des images sismiques avant, ainsi que des capteurs décalés par rapport à ces émetteurs, dans la direction d'acquisition, d'un déport (algébrique) inverse de celui utilisé pour l'acquisition des images avant.

30 Ce choix d'émetteurs et capteurs est extrait des données lors de la migration.

Les images avant et arrière ainsi déterminées sont ensuite utilisées pour déterminer la valeur correcte de γ_{eff} .

En effet, on a vu qu'il avait été montré que le déport x_c du point de conversion par rapport à la source, dans la direction d'acquisition, dépend
5 de γ_{eff} au premier ordre et du paramètre γ_0 , ainsi que de la quantité $T_c.V_c^2$ au second ordre.

Or, la détermination de cette quantité $T_c.V_c^2$ souffre d'un étalement du point de conversion qui dépend de l'erreur sur γ_{eff} , mais cet étalement intervient toujours en sens opposé dans le cas où l'on inverse un couple
10 émetteur/récepteur donné.

La cohérence latérale, c'est à dire le déport ΔX entre image avant et arrière est donc nulle lorsque la valeur de γ_{eff} est correcte.

Ainsi, la condition $\Delta X = 0$ est équivalente à une détermination exacte de γ_{eff} ou à une détermination exacte du déport X_c du point de
15 conversion (détermination dite de la configuration à point de conversion commun ou PCC).

C'est ce qui est illustré sur les figures 3a et 3b. La figure 3a représente l'une en dessous de l'autre les images sismiques migrées avant et arrière obtenues pour γ_{eff} quelconque. L'image avant ne correspond à
20 l'image arrière qu'avec un décalage ΔX . La figure 3b représente quant à elle l'une en dessous de l'autre les images sismiques avant et arrière obtenues après détermination de la valeur de γ_{eff} , c'est à dire après mise en configuration à point de conversion commun. Il n'y a alors pas de décalage entre les images avant et arrière.

25 Le procédé met donc en œuvre un traitement permettant de déterminer la valeur de γ_{eff} pour laquelle le décalage ΔX est nul.

Cette détermination de la valeur de γ_{eff} pour laquelle le décalage ΔX est nul se fait par exemple en posant

$$vp_{\alpha} = \alpha vp_0 \text{ et } vs_{\beta} = \beta vs_0.$$

où vp_0 et vs_0 sont les valeurs approximatives de vitesses réelles locales de compression et de cisaillement déterminées au moyen de migrations mises en œuvre sur les acquisitions PP et PS initiales et où α et β sont des variables.

- 5 On peut par exemple utiliser pour vp_0 et vs_0 des valeurs globales correspondant à une estimation d'une vitesse moyenne à travers toutes les couches, y compris la couche analysée. On peut montrer qu'il est possible d'utiliser, au lieu des invariants classiques Vp , Vs , Tp , Ts , Vc , γ_{eff} et γ_0 , les invariants Tp , Fp , Ts , Fs , ou encore Tp , Fp , Tc , Fc , où Fp , Fs et Fc vérifient

$$\begin{aligned} 10 \quad Fp &= Tp \cdot Vp^2 \\ Fs &= Ts \cdot Vs^2 \\ Fc &= Tc \cdot Vc^2 \end{aligned}$$

- Ces invariants sont en effet mathématiquement équivalents aux invariants classiques Vp , Vs , Tp , Ts , Vc , γ_{eff} et γ_0 . Ils ont l'avantage d'être
15 facilement calculable à partir d'un champ de valeurs vp , vs , puisque que l'on a :

$$\begin{aligned} Tp &= \int_{z_0}^z \frac{dl}{vp} \\ Fp &= \int_{z_0}^z vp \cdot dl \\ Ts &= \int_{z_0}^z \frac{dl}{vs} \\ 20 \quad Fs &= \int_{z_0}^z vs \cdot dl \\ \text{et } \gamma_{eff} &= Fp/Fs \end{aligned}$$

- où vp et vs sont les valeurs de vitesses réelles locales de compression et de cisaillement, où l désigne la coordonnée de la profondeur dans le sous-sol, où z est la valeur de cette coordonnée de
25 profondeur à la surface inférieure de la dernière couche à analyser et où z_0 est la valeur de cette coordonnée de profondeur à la surface supérieure de cette couche ou d'une couche au dessus de celle-ci,

Par ailleurs :

- Tp , Fp , Ts , Fs constituent les quatre paramètres indépendants
30 fondamentaux dont tous les autres se déduisent.

$$\gamma_{\text{eff}} = F_p / F_s,$$

$$\gamma_0 = T_s / T_p,$$

$$F_c = F_p + F_s,$$

$$T_c = T_p + T_s,$$

$$5 \quad V_p = \sqrt{(F_p / T_p)}$$

$$V_s = \sqrt{(F_s / T_s)}$$

$$V_c = \sqrt{(F_c / T_c)}$$

etc.

Il en résulte que les combinaisons quatre par quatre suivantes sont

10 suffisantes pour déterminer complètement le problème.

(T_p , F_p , T_s , F_s)

(T_p , F_p , T_c , F_c)

(F_c , T_c , γ_0 , γ_{eff})

(ce sont les plus utiles),

15 et encore :

(T_p , V_p , T_s , V_s)

(T_p , V_p , T_c , V_c)

etc.

Pour chaque couple (α , β), on remplace les paramètres γ_0 , γ_{eff} , T_p ,

20 F_p , F_c par

$$\gamma_0' = \alpha / \beta * \gamma_0$$

$$\gamma_{\text{eff}}' = \alpha / \beta * \gamma_{\text{eff}}$$

$$T_p' = T_p * (1 + \gamma_0) / (1 + \gamma_0')$$

$$F_p' = F_p * \alpha^2 * (1 + \gamma_0) / (1 + \gamma_0')$$

$$25 \quad F_c' = F_c * \alpha \beta * (1 + \gamma_0) / (1 + \gamma_0') * (1 + \gamma_{\text{eff}}') / (1 + \gamma_{\text{eff}})$$

et on met en œuvre sur les données sismiques une migration PS correspondant à ces nouveaux paramètres.

Après migration des données sismiques, on calcule la corrélation entre les images sismiques avant et les images sismiques arrière.

30 On choisit le couple (α , β) pour lequel cette corrélation est la plus importante.

Ce traitement est avantageusement mis en œuvre en utilisant $\beta = 1/\alpha$, ce qui permet de n'avoir à faire varier que la variable α (contre factorisation de v_s et v_p).

Une fois γ_{eff} ainsi déterminé, on met en œuvre dans une nouvelle
5 étape (étape 3 - focalisation H, la lettre H désignant en effet classiquement le déport source-récepteur) un traitement destiné à permettre de raffiner la valeur du paramètre F_c .

A cet effet, on fait varier v_p et v_s tout en maintenant γ_{eff} constant.

Par exemple, on pose $v_{p\alpha} = \alpha v_{p1}$ et $v_{s\alpha} = \alpha v_{s1}$, où v_{p1} et v_{s1} sont
10 les valeurs déterminées pour v_p et v_s dans l'étape 2, et où α est une variable que l'on fait varier (co factorisation de V_p et V_s).

On détermine les nouveaux paramètres γ_0' , γ_{eff}' , T_p' , F_p' , F_c' correspondant à ces vitesses $v_{p\alpha}$ et $v_{s\alpha}$ (en remplaçant β par α dans la formulation donnée ci-dessus pour ces paramètres) et on met en œuvre un
15 traitement de migration en utilisant une modélisation qui correspond à ces paramètres. La migration produit cette fois-ci des collections à point de conversion (candidat) commun. Au lieu de regarder une image pour un déport avant et une image pour un déport arrière sur toute une ligne image, on regarde cette fois-ci en un ensemble de positions spatiales discrètes
20 (position PCC ou Point de Conversion Commun) alignées selon la direction de déport considérée.

La valeur retenue pour F_c est celle qui correspond à la valeur de α pour laquelle l'alignement selon la direction de déport est optimale. L'analyse se fait sur autant de positions CCP que souhaité.

25 γ_{eff} et F_c ayant ainsi été déterminés à l'issue de cette troisième étape, il en va de même pour F_s et F_p .

Il reste néanmoins à déterminer T_p et γ_0 , qui dépendent l'un de l'autre.

γ_0 commande la condition de mise en profondeur commune des
30 images PP (mais ne suffit pas à l'assurer sauf dans l'hypothèse incertaine d'une parfaite isotropie pour les ondes P et S). A contrario, une mesure

indépendante de γ_0 , contrainte par la condition de mise en profondeur commune PP et PS donne un accès à l'anisotropie du milieu.

Tp est avantageusement déterminé, dans une étape 4, à partir du champ de vitesse vp déterminé à partir de l'analyse des ondes PP. On
5 notera que la détermination de Tp n'est pas indispensable à la détermination des paramètres Fp et Fs qui ont été déterminés de façon cohérente grâce au traitement de l'étape 2 sur les ondes PS.

On dispose ainsi à l'issue de cette étape 4 de tous les paramètres de modélisation PS et PP : Tp, Fp, Ts, et Fs sont connus.

10 Dans une étape 5, on met en œuvre un traitement de mise en profondeur commune des modèles de vitesses S et P. En effet, les déterminations des paramètres Tp, Fp, Ts et Fs faites dans les étapes précédentes ont été faites sur la dernière couche et ne préjugeaient pas de l'existence d'une éventuelle anisotropie. Toutefois, la détermination de ces
15 paramètres invariants a une profondeur commune aux modèles P et S nécessite de prendre en compte l'anisotropie (en effet les invariants T et F font intervenir des vitesses locales différentes en cas d'anisotropie).

On utilise à cet effet un traitement se fondant sur un modélisation de l'isotropie transverse verticale ("VTI" ou "Vertical axis Transverse
20 Isotropy" selon la terminologie anglo-saxonne utilisée par l'homme du métier) du type de celle proposée par Thomsen dans :

[3] - Weak elastic anisotropy ; Geophysics, 51, 1954-1966 - Thomsen, 1986.

et utilisant notamment les paramètres d'anisotropie δ et σ introduits
25 par Thomsen dans sa publication précitée.

(On rappelle que ces paramètres d'anisotropie vérifient en particulier :

$$V_{nmop} = V_{p0} \sqrt{1+2\delta} \text{ et } V_{nmos} = V_{s0} \sqrt{1+2\sigma}$$

où V_{nmop} et V_{nmos} sont les vitesses NMO apparentes de
30 compression et de cisaillement et où V_{p0} et V_{s0} sont les vitesses verticales).

La vraie profondeur Zr est commune aux vrais modèles de vitesses P et S, et est reliée à Fp, Tp dans le premier modèle, et à Fs, Ts dans le

second, par les deux paramètres d'anisotropie δ et σ indépendants entre eux.

Or, ces paramètres δ et σ sont contraints, en termes de valeurs moyennes apparentes, par la relation

$$5 \quad \gamma_{\text{eff}}/\gamma_0 = (1+2\delta)/(1+2\sigma).$$

De plus, les paramètres invariants T_p , F_p , T_s et F_s étant des intégrales sur la profondeur, ils se prêtent naturellement à une analyse couche par couche ("effeuillage" ou « layer stripping »), le problème se ramenant à une détermination locale des invariants au toit de la dernière

10 couche.

On va alors déterminer 5 inconnues locales, $(v_p, v_s, Z, \delta, \sigma)$ - c'est à dire les vitesses correspondant à la propagation en mode P et à la propagation en mode S, la profondeur commune de la base de la couche, et les deux paramètres d'anisotropie - avec quatre mesures, T_p , T_s , F_p , et F_s .

15 Une détermination complète requiert soit de l'information à grand déport, soit de l'information de puits pour contraindre Z ou δ .

Par exemple, on impose $\delta = 0$.

La focalisation et le calage des images PP et PS revient alors à résoudre le système d'équations suivant pour en trouver les solutions Z, v_p ,

20 v_s, σ

$$T_p = \int_{z_0}^z dl / V_p$$

$$F_p = \int_{z_0}^z V_p \cdot \sqrt{1+2\delta} \cdot dl$$

$$T_s = \int_{z_0}^z dl / V_s$$

$$F_s = \int_{z_0}^z V_s \cdot \sqrt{1+2\sigma} \cdot dl$$

25

Dans une dernière étape (étape 6), on met en œuvre un traitement de courbure à grand déport. La résolution de l'analyse de vitesse des ondes P et S en milieu anisotrope, par des approximations isotropes et court déport n'a plus laissé qu'un seul degré de liberté au problème: le

comportement a grand déport ou l'anisotropie se manifeste le plus clairement. Le comportement des temps de trajet à grand déport est sondé par migration avant addition en faisant varier les paramètres d'anisotropie tout en maintenant constant le rapport $(1+2\delta)/(1+2\sigma)$.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de prospection sismique selon lequel on émet dans le sous-sol une onde sismique de compression et on recueille à l'aide de capteurs des données sismiques ayant au moins une composante de cisaillement et selon lequel on traite les données correspondant à cette composante de cisaillement pour en déduire une information sur la géologie du sous-sol, caractérisé en ce qu'on détermine une estimation du rapport $\int_{z_0}^z v_p \cdot dl / \int_{z_0}^z v_s \cdot dl$, où v_p et v_s sont les valeurs de vitesses réelles locales de compression et de cisaillement, où l désigne la coordonnée de la profondeur dans le sous-sol, où z est la valeur de cette coordonnée de profondeur à la surface inférieure de la dernière couche à analyser et où z_0 est la valeur de cette coordonnée de profondeur à la surface supérieure de cette couche ou d'une couche au dessus de celle-ci,
- et on inverse les données sismiques afin de déduire les valeurs de vitesses locales de compression et de cisaillement pour ladite couche à analyser, en utilisant une modélisation dans laquelle cette estimation est utilisée pour le paramètre invariant γ_{eff} .
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'on détermine le paramètre γ_{eff} en mettant en œuvre, pour différentes valeurs possibles pour celui-ci, un traitement de migration des données sismiques qui correspondent à la composante de cisaillement, et en déterminant la valeur du paramètre γ_{eff} pour laquelle les images sismiques avant et arrière sont les mieux corrélées.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que pour faire varier le paramètre γ_{eff} , on pose $v_{p\alpha} = \alpha v_{p0}$ et $v_{s\beta} = \beta v_{s0}$,
où v_{p0} et v_{s0} sont les valeurs approximatives préalablement déterminées pour v_p et v_s ,
et on fait varier à la fois les variables α et β .

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que la modélisation fait intervenir comme paramètres invariants au moins quatre des paramètres γ_0 , γ_{eff} , T_p , F_p , T_c , F_c , avec $\gamma_0 = T_s/T_p$, $\gamma_{eff} = F_p/F_s$, $T_c = T_p + T_s$ où T_p et T_s représentent respectivement des temps de trajets
 5 verticaux des ondes de compression et de cisaillement, où F_p est tel que $(F_p/T_p)^{1/2}$ représente une vitesse de compression et où F_c est tel que $((F_c - F_p)/T_s)^{1/2}$ représente une vitesse de cisaillement.

5. Procédé selon les revendications 3 et 4 prises en combinaison, caractérisé en ce que, lorsque l'on fait varier les variables α et β , on
 10 remplace les paramètres γ_0 , γ_{eff} , T_p , F_p , F_c par

$$\gamma_0' = \alpha/\beta * \gamma_0$$

$$\gamma_{eff}' = \alpha/\beta * \gamma_{eff}$$

$$T_p' = T_p * (1 + \gamma_0)/(1 + \gamma_0')$$

$$F_p' = F_p * \alpha^2 * (1 + \gamma_0)/(1 + \gamma_0')$$

$$15 \quad F_c' = F_c * \alpha\beta * (1 + \gamma_0)/(1 + \gamma_0') * (1 + \gamma_{eff}')/(1 + \gamma_{eff})$$

et on met en œuvre sur les données sismiques une migration correspondant à ces nouveaux paramètres.

6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que pour faire varier le paramètre γ_{eff} , on pose $\beta = 1/\alpha$ et on fait varier α .

20 7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'à l'issue de la détermination du paramètre γ_{eff} , on fait varier v_p et v_s tout en maintenant γ_{eff} constant et on détermine le paramètre F_c pour lequel l'alignement selon la direction de dépôt est maximal.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce pour faire
 25 varier v_p et v_s , on pose $v_{p\alpha} = \alpha v_{p1}$ et $v_{s\alpha} = \alpha v_{s1}$, où v_{p1} et v_{s1} sont des valeurs déterminées pour v_p et v_s dans l'étape 2, et on fait varier la variable α .

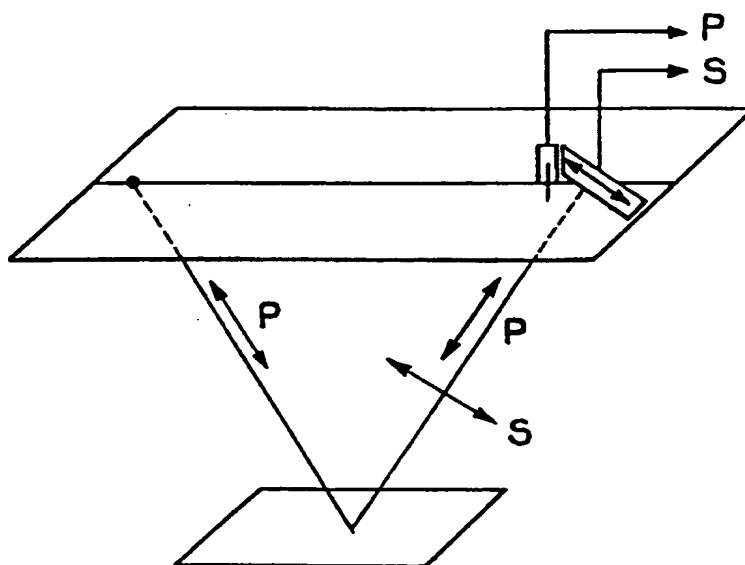
9. Procédé selon l'une des revendications 7 ou 8, caractérisé en ce qu'à l'issue de la détermination du paramètre F_c , on détermine le paramètre
 30 T_p et/ou le paramètre $\gamma_0 = T_s/T_p$.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que le paramètre T_p est avantageusement déterminé à partir du champ de vitesse v_p déterminé à partir de l'analyse de la composante de compression des données sismiques.

- 5 11. Procédé selon l'une des revendications 9 et 10, caractérisé en ce qu'on met ensuite en oeuvre un traitement de mise en profondeur commune des modèles de vitesses S et P.

12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'à l'issue du traitement de mise en profondeur, on met en oeuvre un traitement à
10 courbure à grand déport en faisant varier les paramètres d'anisotropie δ et σ tout en maintenant constant le rapport $(1+2\delta)/(1+2\sigma)$.

1 / 3

FIG.1

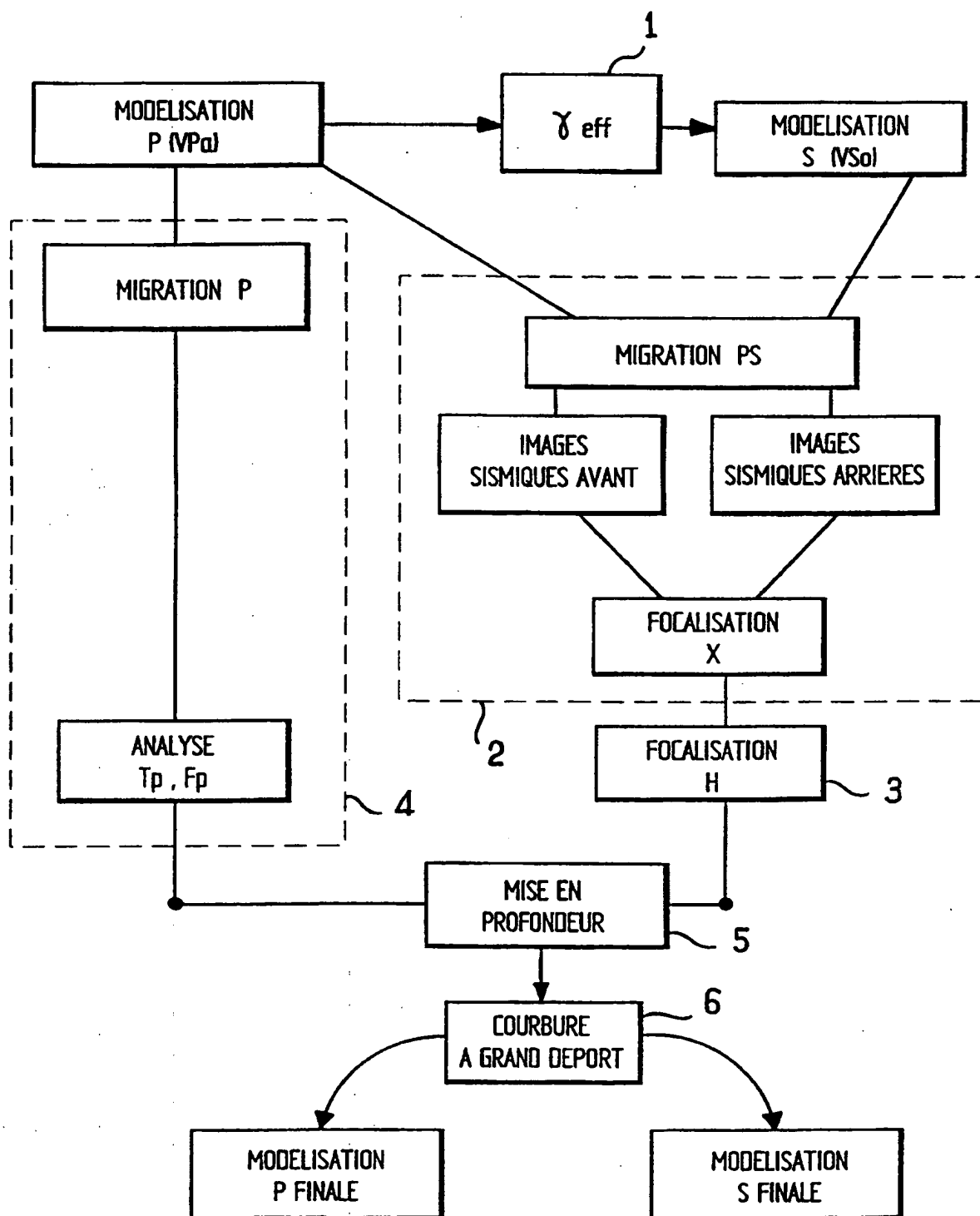
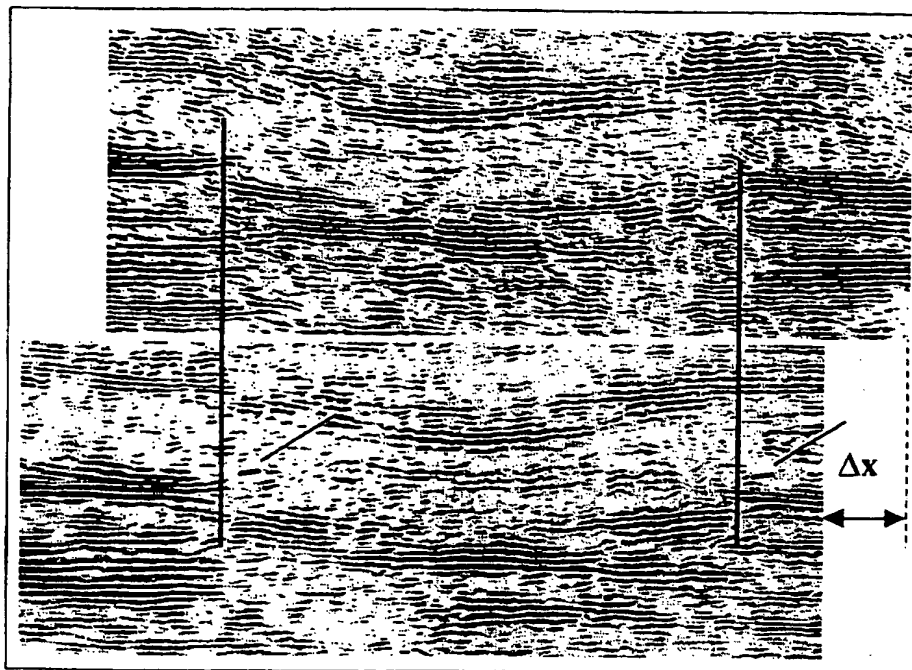
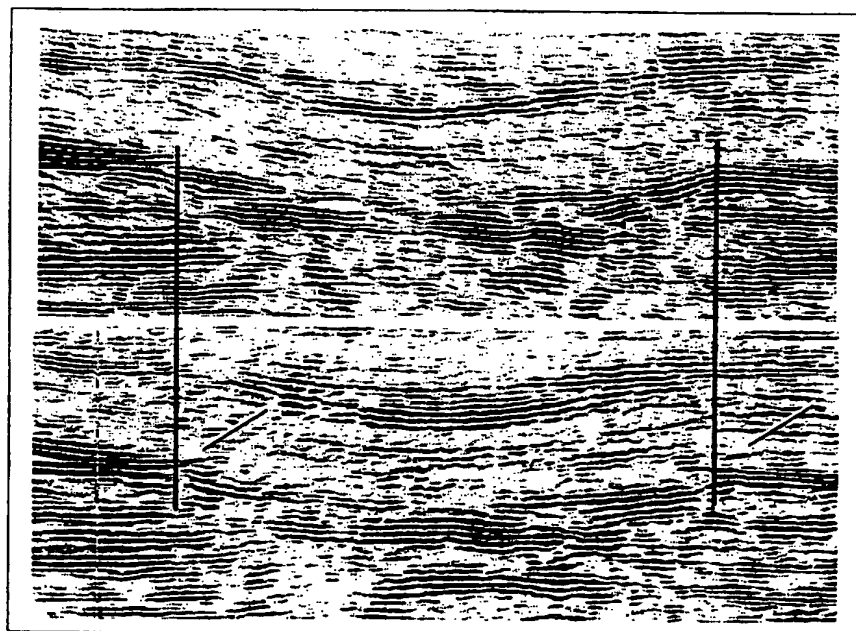


FIG. 2

FIG. 3aFIG. 3b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Patent Application No.

FR 00/02984

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G01V1/28

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

INSPEC, EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 835 452 A (MUELLER MICHAEL C ET AL) 10 November 1998 (1998-11-10) abstract	1
A	US 4 881 209 A (BLOOMQUIST MARVIN G ET AL) 14 November 1989 (1989-11-14) column 7, line 12 -column 8, line 43	1
A	GAISER J E: "Multicomponent V/sub p//V/sub s/ correlation analysis" GEOPHYSICS, JULY-AUG. 1996, SOC. EXPLORATION GEOPHYSICISTS, USA, vol. 61, no. 4, pages 1137-1149, XP002143571 ISSN: 0016-8033	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *A* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 December 2000

Date of mailing of the international search report

02/01/2001

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Swartjes, H

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Intern. Application No.

PCT/FN/02984

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, A	<p>WO 99 54758 A (BP AMOCO CORP) 28 October 1999 (1999-10-28) page 37, line 21 -page 40, line 4 -----</p>	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR 00/02984

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5835452 A	10-11-1998	AU 699854 B AU 7389996 A CA 2202168 A CN 1165561 A EP 0796441 A NO 971184 A PL 321156 A WO 9713165 A	17-12-1998 28-04-1997 06-04-1997 19-11-1997 24-09-1997 04-08-1997 24-11-1997 10-04-1997
US 4881209 A	14-11-1989	NONE	
WO 9954758 A	28-10-1999	US 6128580 A	03-10-2000

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)